

高含水率木材指榫连接后主要力学性能初探

李光耀, 吕泽军, 刘志坤*

(浙江农林大学 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘 要:将新采伐(均在纤维饱和点以上)的马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)指榫连接, 气干后进行指榫连接处静曲强度、弹性模量、顺纹抗压强度试验, 以对应的对照材为参照, 探索指榫连接处的有效率。结果表明, 3 种高含水率木材指榫连接后, 指榫连接处会较大幅度降低静曲强度, 而同种木材, 水平型静曲强度略大于垂直型; 指榫连接处静曲强度有效率由高至低依次为: 马尾松、杉木、香樟, 弹性模量有效率均不 $\leq 86\%$; 在一定密度范围内, 木材的密度越大, 指榫连接处顺纹抗压强度有效率越高。

关键词:高含水率木材; 指榫连接; 静曲强度; 弹性模量; 顺纹抗压强度

中图分类号:S781.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)03-0224-04

A Preliminary Study on the Main Mechanical Properties of the High Moisture Content Wood after Finger-jointed

LI Guang-yao, LYU Ze-jun, LIU Zhi-kun*

(School of Engineering, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Linan, Zhejiang 311300, China)

Abstract: Finger-jointed wood made of the new logged *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, and *Cinnamomum camphora* with moisture content above fiber saturation point were tested for MOR, MOE, compression strength parallel to grain after air-drying. Take wood itself as the control, the efficient rate of the finger-joint location was explored. The results indicated that the MOR at the part of finger-joint location fell after three kinds of high moisture content of wood being finger-jointed, while the MOR of H-type slightly larger than the V-type in the same wood. In descending order of the efficient rate of the finger-joint location, that is *P. massoniana*, *C. lanceolata*, and *C. camphora*, the MOE of the efficient rate of the finger-joint location was not less than 86%. In a certain density range, the greater the density of the wood, the higher the compression strength parallel to grain of the efficient rate of the finger-joint location was.

Key words: high moisture content of wood; finger-joint; MOR; MOE; compression strength parallel to grain

当前木材资源短缺, 特别是优质木材资源日益减少, 我国木材短缺尤其严重, 指接技术可以使劣材优用, 提高材料的综合利用率, 对缓解木材供需矛盾具有重要现实意义。指接技术研究中, 木材含水率、指榫工艺参数、木材材质和胶合工艺等都对木材的强度有影响。含水率不仅影响木材本身力学性

能^[1-2], 还对指接接口的胶合质量、对静曲弹性模量有显著影响^[2-5]。桉树木材指接材的嵌合度、端压、指形和胶粘剂研究表明, 4 个工艺因子对抗弯强度有显著影响^[6]。樟子松结构用指接材在指榫嵌合度为 0、0.1、0.3 mm 时, 端压范围分别为 1.3~3.0 MPa、2.0~3.5 MPa 和 2.5~4.5 MPa, 相对试验测

收稿日期: 2014-08-09 修回日期: 2014-11-30
基金项目: 浙江省自然科学基金(Z3110223)。
作者简介: 李光耀, 男, 副教授, 研究方向: 家具设计与工程。E-mail: LGY@zafu.edu.cn
* 通信作者: 刘志坤, 男, 教授, 研究方向: 木材改性与应用。E-mail: Liuzhikun@zafu.edu.cn

试结果小,端压最佳取值为 3.5 MPa^[7]。黑云杉(0.45 g/cm³)试材 3 种接合方式的强度性能试验结果表明,羽型接合的强度最高(5 513 MPa),嵌入型次之(5 219 MPa),翼型最低(4 714 MPa)。开发适用于高含水率木材或者生材的胶黏剂,是目前指接材研究的热点;端压对指接材的极限抗拉强度影响显著^[8-10]。J. Ayardwa^[11]研究了在其他条件相同时,3 种阔叶指接材的抗拉强度与密度的关系。对单板层积材指接接口抗弯性能研究结果表明,无压养护时,垂直指接接口的抗弯强度优于水平指接接口的抗弯强度;有压养护时,水平指接接口的抗弯强度与垂直指接接口的抗弯强度无显著差异^[12]。

目前相关企业普遍采用干法指接,对湿法指接的研究甚少^[13-14],新西兰林业研究所使用催化剂加速树脂固化,进行湿材指接,此工艺对原生产设备改动不大。强度试验表明,指接工艺所获得的指接材的强度,比标准窑干或气干木材的强度平均高 5%^[15]。目前生产中全部采用干法指接,而湿法指接除个别研究外,生产中尚未采用。本研究对新伐小径材进行锯解加工后马上采用湿法指榫接长、拼宽等加工,然后再进行气干或窑干,探索指接材力学性能,以便在生产中降低成本,提高速生小径材综合利用率,缓解资源紧张矛盾。

1 材料与方法

1.1 试材制备及仪器设备

马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、樟(*Cinnamomum camphora*),树龄分别 25、22 a 和 45 a,2013 年 12 月采自江西省资溪县马头山林场,采伐后约 21 d 在正常指榫生产线上进行加工,首先将原木锯刨成本方,取离地 1 m 至 3 m 间木方为试验材料,木方断面规格尺寸为 60 mm×100 mm,再将方材进行指榫加工,指榫处含水率在 40%~50% 的状态下涂胶、纵向加压指榫连接,制成试材。指榫参数测量试件直接采用指榫加工后的连接单元,力学性能试件待指榫连接后的试材气干至含水率 12%~15% 时,根据力学性能测试试件的尺寸规格要求制得。

试验仪器与设备:上海铸金分析仪器有限公司生产的电子万能力学试验机 DNS 50;佛山市顺德区伦教沃克尼奥机械厂生产的精密推台锯 MJ132B;扫描仪 MRS-2400U2;游标卡尺,精度为 0.01 mm;电子天平 JJ300。

1.2 指榫参数测量方法

3 种试材指榫采用相同设备、同一刀具加工,加

工后挑选指榫轮廓最为清晰的马尾松试材进行指榫参数测定。用游标卡尺测得试材的实际宽度后,将马尾松试材通过扫描仪扫描获得指榫形状图像,将图像导入 AutoCAD 软件中,放大至可清晰辨别轮廓后用细实线将其轮廓描出,用 CAD 分别测量出图像上指榫高和试材的宽度,得出其比例关系,因扫描和导入都未变形,其比例关系适用试材上各参数。以连接齿底线的直线为基线(因齿底线不在同一直线上,故基线取为齿底线上分布均匀的直线),从而获得试材上榫高(h)、齿顶宽(a)和齿底宽(b)的实际尺寸。对于斜角 α_1 和斜角 α_2 则可利用 CAD 中量角功能直接获得。对同一单元体上的所有齿形进行测量。

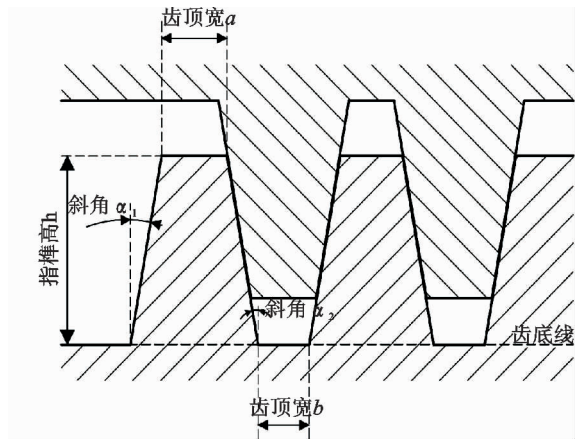


图 1 指榫参数示意图

Fig. 1 Diagram of finger joint parameters

1.3 密度与力学性能测定

按《木材密度测定方法》GB/T 1933-2009、《木材抗弯强度试验方法》GB/T1936. 1-2009、《木材抗弯弹性模量测定方法》GB/T1936. 2-2009、《木材顺纹抗压强度试验方法》GB/T1935-2009,测试试件密度、静曲强度、弹性模量及顺纹抗压强度。静曲强度、弹性模量试件的尺寸规格为 300 mm×20 mm×20 mm,为使集中载荷施加在指榫结合处,指接材试件制作时特别注意使指榫位于试件正中;顺纹抗压强度试件尺寸为 30 mm×20 mm×20 mm,指接材试件指榫位于试件正中位置。静曲强度、弹性模量试件及顺纹抗压强度试件数量均为 8 个,对照材试件均取自相同顺纹方向上且无指接的部分。

2 结果与分析

指接材的指榫参数列于表 1。3 种指接材的平均密度测定值列于表 2。对 3 种指接材指接处及对照材的静曲强度、弹性模量、顺纹抗压强度测定结果列于表 3。马尾松垂直型、水平型的平均静曲强度

分别为对照材强度的 71%、76%，水平型比垂直型强度大 5%；垂直型、水平型平均弹性模量为对照材的 168%、210%，两者都要比对照材大的多，而水平型比垂直型要大。

表 1 指接材的指榫参数
Table 1 Parameters of finger joints

尺寸类型	指榫高 h/mm			齿顶宽 a/mm			齿底宽 b/mm			斜角 $\alpha_1/(\text{^\circ})$			斜角 $\alpha_2/(\text{^\circ})$			嵌合度/ mm		
	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ
尺寸数据	12.06	11.37	11.73	1.17	0.90	1.00	0.81	0.53	0.66	5.69	4.44	5.18	6.83	4.61	5.80	0.58	0.19	0.34

注:Max 指最大值,Min 指最小值,EQ 为平均值,下同。

表 2 3 种指接材的平均密度
Table 2 Mean density of three kinds of finger-jointed lumbers

名称	宽/ mm	厚/ mm	长/ mm	体积/ cm^3			质量/ g			密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		
	EQ	EQ	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ	Max	Min	EQ
马尾松	21.22	21.26	300.22	138.84	131.95	135.40	86.46	76.78	83.36	0.66	0.58	0.62
杉木	21.10	20.79	301.32	135.77	129.13	132.19	42.80	40.27	41.42	0.32	0.31	0.31
香樟	20.97	20.97	300.21	134.26	130.18	132.02	75.86	67.66	71.44	0.58	0.52	0.54

表 3 3 种指接材指接处及对照材静曲强度、弹性模量、顺纹抗压强度
Table 3 MOR, MOE and compression strength parallel to grain of three finger-jointed lumber and control piece

名称	试件类型		静曲强度/ MPa	弹性模量/ MPa	顺纹抗压强度/ MPa
马尾松	指接材	垂直型	45.711	5 187	42.262
		水平型	49.417	6 485	
	对照材		64.560	3 085	50.853
杉木	指接材	垂直型	26.707	4 552	21.539
		水平型	27.218	4 206	
	对照材		39.822	4 209	34.476
香樟	指接材	垂直型	37.069	6 220	36.159
		水平型	40.628	5 941	
	对照材		79.313	6 941	42.247

注:表中数据均为平均值,静曲强度和弹性模量试件,指接材均在指接处断裂,对照材均在中间断裂。

杉木垂直型、水平型的平均静曲强度分别为对照材的 67%、68%，水平型比垂直型强度大 1%；垂直型、水平型平均弹性模量为对照材的 108%、100%，垂直型比水平型比对照材大 8%。

香樟木垂直型、水平型的平均静曲强度分别为对照材的 47%、51%，水平型比垂直型强度大 4%；垂直型、水平型平均弹性模量分别为对照材的 90%、86%，垂直型比水平型大 4%。

马尾松、杉木和香樟木对照材的平均顺纹抗压强度从大到小依次为:马尾松、香樟木、杉木,与密度规律一致;对应的指接材的平均顺纹抗压强度从大到小依次为:马尾松、香樟木、杉木,与对照材规律一致,且比对应的对照材小;3 种指接材的顺纹抗压强度为对照材的 83%、62%、86%，马尾松的顺纹抗压强度有效率比香樟木小 3%，比杉木要大的多。

3 结论与讨论

3 种高含水率木材指榫连接后,指榫连接处会较大幅度降低静曲强度,而同种木材,水平型静曲强度略大于垂直型。前人研究表明,通过干法指接生产工艺得到的指接材,静曲强度相对于木材本身都

要低^[8-10],因此,无论高含水率木材指榫连接或一般干法指接,均可将指榫连接处看作木材缺陷。因不同方向的指榫连接处的胶层受力情况、主要承载部位不同,对指榫连接处的抗弯性能有影响,本研究对 2 种不同方向的抗弯性能加以研究,发现垂直型、水平型静曲强度无显著差异。

在一定密度范围内,木材的密度越大,指榫连接处顺纹抗压强度越高。当胶黏剂本身内聚强度以及胶黏剂与木材的界面强度大于木材本身时,胶接处破坏往往发生在木材,胶合强度随木材密度的增加而提高^[16]。由于本试验采用聚氨酯胶黏剂且破坏发生在木材,故顺纹抗压强度很大程度上取决于木材密度。

指榫连接处的强度越接近于木材本身的强度,说明指榫质量越好,与一般干法指接生产的指接材相比,相差不大。虽然通过高含水率木材指榫连接与一般干法指接工艺所生产的指接材力学性能相似,但实现高含水率木材指接,不仅易于后续加工,还能节约大量时间和能源,避免干燥损失,因而,该技术在应用中更具推广性。

一般情况下,木材密度越大,胶合强度越大,木

材本身的力学强度也越大,若两者的增量不同,力学强度的有效率也不同。指榫连接处静曲强度有效率由高至低依次为:马尾松、杉木、香樟木,弹性模量有效率均不 $\leq 86\%$;指榫连接处顺纹抗压强度有效率由高至低依次为:香樟木、马尾松、杉木。静曲强度有效率与密度无明显关系,而顺纹抗压强度有效率与密度有一定关联,在一定密度范围内,密度越大,顺纹抗压强度有效率越大。对 3 种阔叶指接材研究结果表明,指接强度有效率分别为低密度木材($0.351\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 88% 、中密度木材($0.677\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 78% 而高密度木材($0.819\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)仅为 60% ^[11],因本次试验马尾松、杉木和香樟木的平均密度分别为 0.58 、 $0.31\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,密度跨距不大,故对只能反应中低密度木材高含水率指接材有效率的规律,而中高密度木材仍需进一步探索。

参考文献:

[1] 黄腾华,符韵林,李宁. 擎天树木木材物理力学性质研究[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5):160-163.
HUANG T H, FU Y L, LI N. Physical and mechanical properties of *Shorea chinensis* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5):160-163. (in Chinese)

[2] 梁宏温,黄寿先,覃亚丽,等. 23 年生大叶栎木材物理力学性质的初步研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1):115-118.
LIANG H W, HUANG S X, TAN Y L, *et al.* Preliminary researches of the wood physical mechanical properties of 23-year-old *Castanopsis fissa*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1):115-118. (in Chinese)

[3] 宋威,张宏健. 含水率对 PF-LVL 指接部位静曲弹性模量的影响[J]. 西南林业大学学报. 2013, 33(4):85-88.
SONG W, ZHANG H J. Effect of moisture content on the modulus of elasticity of the finger-joints of PF-LVL[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2013, 33(4):85-88. (in Chinese)

[4] MENG G, DELAHUNTY S, CHUI Y H. Development of a material efficient finger-joint profile for structural finger-jointed lumber[R]. Canada:University of New Brunswick, 2009: 1-19.

[5] ST-PIERRE B, BEAUREGARD R, MOHAMMAD M, *et al.* Effect of moisture content and temperature on tension strength of finger-jointed black spruce lumber[J]. Forest Products Journal, 2005, 55(2):9-16.

[6] 林兰英,傅峰. 人工林桉树木材指接工艺研究[J]. 木材加工

机械, 2007 (1):10-15.

LIN L Y, FU F. Study on the finger-joint technology for eucalyptus plantation[J]. Wood Processing Machinery, 2007 (1): 10-15. (in Chinese)

[7] 何盛,林兰英,傅峰,等. 指接材端压有限元的模拟分析[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2014, 38(2):16-20.
HE S, LIN L Y, FU F, *et al.* Finite element analysis for end-pressure of finger-jointed lumber[J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition, 2014, 38(2):16-20. (in Chinese)

[8] BUSTOS C, MOHAMMAD M, HERNNDEZ R E, *et al.* Effects of curing time and end-pressure on the tensile strength of finger-jointed black spruce lumber[J]. Forest Products Journal, 2003, 53 (11/12):85-89.

[9] BUSTOS C, BEAUREGARD R, MOHAMMAD M, *et al.* Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations[J]. Forest Products Journal, 2003, 53(9):72-76.

[10] BUSTOS C, HERN NDEZ R E, BEAUREGARD R, *et al.* Effects of end-pressure on the finger-joint quality of black spruce lumber;a microscopic analysis[J]. Maderas. Cienciay Tecnología, 2011, 13(3):319-328.

[11] AYARDWA J, HIRASHIMA Y, SASAKI Y. Effect of finger geometry and end pressure on the flexural properties of finger-jointed tropical African hardwood[J]. Forest Products Journal, 2000, 50 (11/12):53-63.

[12] 宋威,孙伟,黄宇翔,等. 指接方向对单板层积材指接接口抗弯强度的影响[J]. 吉林农业, 2011(11):232-232.

[13] 刘星雨,傅万四,赵章荣,等. 我国指接技术研究现状与发展趋势[J]. 木材加工机械, 2012 , 23(5):62-67.
LIU X Y, FU W S, ZHAO Z R, *et al.* The current research status and development trend of finger-jointed technology in China[J]. Wood Processing Machinery, 2012 , 23(5):62-67. (in Chinese)

[14] 林兰英,傅峰. 指接材研究现状与进展[J]. 木材工业, 2007, 21(4):5-8.
LIN L Y, FU F. Research status and developing trends of finger-jointed lumber[J]. China Wood Industry, 2007, 21 (4):5-8. (in Chinese)

[15] PEASE D A. Finger joint plant gives green process a restart [J]. Wood Technology, 1998, 125 (2):36-40.

[16] 王炼,程瑞香. 木材影响其胶合强度的诸因素分析[J]. 中国人造板, 2006(8):10-13.
WANG L, CHENG R X. Effects of wood material factors on bonding strength of wood[J]. China Wood-Based Panels, 2006(8):10-13. (in Chinese)